

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

БОГОМОЛОВА ОКСАНА СЕРГІЇВНА

УДК 621.311

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ОЦІНКИ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ТА
ВІТРОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ У ВУЗЛАХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричних мереж та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кирик Валерій Валентинович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри електричних мереж та систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Блінов Ігор Вікторович
Інститут електродинаміки НАН України,
заступник директора інституту з наукової роботи;

кандидат технічних наук, доцент
Рубаненко Олена Олександрівна
Вінницький національний технічний університет,
докторант кафедри електричних станцій і систем/

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради K26.002.06 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. №20, ауд.3.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « 9 » квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Олександр ПРОЦЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Швидкі темпи розвитку та інтеграції розподіленої генерації (зокрема відновлювальних джерел енергії: сонячних та вітрових електростанцій) в електричні мережі України призвели до ускладнення режимів роботи мереж зі зниженням показників якості електричної енергії у вузлах, порушенням роботи релейного захисту і автоматики та ускладненням планування режимів роботи мереж.

Введення значної кількості нових потужностей у енергетичній галузі не свідчить про їхнє подальше ефективне використання та позитивний вплив на параметри режиму енергосистеми. Вплив відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) (тут і в подальшому під ВДЕ матиметься на увазі сонячні та вітрові електростанції) на режими роботи районної електричної мережі (РЕМ) суттєво залежить від значення сумарного розосередженого генерування в ній, від одиничної встановленої потужності ВДЕ та їх типу, а також від їх місця під'єднання до вузлів електричної мережі.

Для забезпечення переваг від впровадження ВДЕ необхідно вдосконалення існуючих методів пошуку місця та потужності ВДЕ, а також проведення наукових досліджень ефективних моделей, методів і технічних рішень по роботі ВДЕ на загальну мережу: оптимізація структури і параметрів джерел ВДЕ, їхнього місця підключення і планування режимів роботи.

Зазначеним задачам присвячені дослідження та розробки багатьох вчених: Буткевича О.Ф., Кириленка О.В., Яндульського О.С., Павловського В.В., Лежнюка П.Д., Кулика В.В., Сегеди М.С., Комара В.О., Денисюка С.П., Попова В.А., Лук'яненко Л.М. та ін. Проте, залишається актуальним питанням ефективного подальшого розвитку зеленої енергетики та розподіленої генерації, розроблення алгоритму економічно та технічно обґрунтованого поєднання спільної роботи різнорідних джерел розподіленої генерації енергії із мережею енергосистеми, виявлення узагальнені закономірності визначення оптимального вузла підключення розподіленої генерації в мережу, плануванні режимів при мінімальному порушенні параметрів режиму роботи системи за перетоками потужності та рівнями напруги.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на кафедрі Електричних мереж та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у відповідності з планами наукових досліджень, а саме, за науково-дослідною роботою «Методи оцінки електроенергетичних режимів, пов'язаних з впровадженням нетрадиційних джерел електроенергії, на основі нечіткої логіки» (№ державної реєстрації 0118U000591), де здобувач була виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в розробленні методів та моделей узагальненого оцінювання обсягів введення потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах електричної мережі для підвищення ефективності проектних та експлуатаційних рішень, що створює

умови для покращення режимів роботи електричної мережі зменшенням втрат потужності та підвищення якості електричної енергії з нормалізацією профілю напруги у вузлах.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються **основні задачі**:

1. Аналіз існуючих методів визначення місць встановлення та потужності відновлювальних джерел енергії.

2. Розробити показник для оцінки впливу джерел ВДЕ на режимні параметри мережі, з метою об'єктивного співставлення різних варіантів їх підключення.

3. Розробка експрес-критерію оцінювання ефективності впровадження джерела ВДЕ у вузли замкненої електричної мережі на стадії проекту.

4. Формування цільової функції та математичної моделі прийняття рішень щодо підключення розподіленої генерації за комплексним критерієм оптимальності.

5. Розробка методу визначення оптимального місця підключення відновлювальних джерел енергії.

6. Розробка системи регулювання напруги в вузлах підключення ВДЕ.

Об'єктом дослідження є режими роботи електричних мереж з джерелами розподіленої генерації.

Предметом дослідження є методи та математичні моделі оцінювання місця підключення і потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах електричної мережі.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використані методи аналітичного та імітаційного моделювання, числові методи, теорія чутливості. Для пошуку оптимальних місць підключення джерел ВДЕ використано апарат теорії нечітких множин, методи аналізу сталих режимів електроенергетичних мереж. Перевірка ефективності розробленого методу та алгоритму проводилась на основі результатів моделювання на сертифікованих програмних комплексах розрахунку режимів РЕМ. Для розроблення системи регулювання напруги використано елементи теорії автоматичного керування та нечіткої логіки.

Наукову новизну складають такі положення:

1. Запропоновано новий метод комплексного оцінювання чутливості вузлів електричної мережі до зміни параметрів для визначення оптимального місця підключення джерел сонячної та вітрової генерації на основі одночасного використання ранжування вузлів за коефіцієнтами розподілу втрат потужності і чутливістю до коливання напруги з урахуванням вкладень в інвестиційно-інноваційний проект відновлювального джерела енергії, що в порівнянні з існуючими методами оцінювання, дозволяє забезпечити дотримання рівнів напруги у вузлах в нормованому діапазоні та зменшити втрати потужності в мережі без використання додаткових засобів компенсації реактивної потужності.

2. Удосконалено метод визначення оптимального значення потужності сонячної та вітрової генерації для підключення в заданому вузлі електричної мережі, який базується на комплексному критерії оптимальності,

що на відміну від існуючих методів, не вимагає циклічного розрахунку режимних параметрів мережі.

3. Розроблено новий узагальнений метод короткотермінового визначення потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах електричної мережі при плануванні її режимів роботи, який на відміну від існуючих дозволяє на основі універсального коефіцієнту генерації забезпечити максимальний рівень генерації активної потужності відновлювального джерела енергії при дотриманні зон безпеки режимних параметрів.

4. Удосконалено математичну модель оцінки рейтингу вузлів пріоритетних для встановлення джерела генерації на основі нечіткого логічного аналізу, яка на відміну від існуючих методів з детермінованим діапазоном параметрів, дає можливість автоматично адаптуватись до зміни зовнішніх умов та наявності нових джерел генерації в мережі.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що:

1. Розроблено експрес-метод оцінювання граничної потужності і вузла підключення сонячної та вітрової генерації на стадії формування проектних рішень, що дозволяє підвищити ефективність функціонування мережі та забезпечити мінімальні втрати потужності та нормований режим напруги мережі без застосування додаткових засобів компенсації реактивної потужності.

2. Розв'язана задача ефективного планування потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах мережі на стадії експлуатаційних рішень, що створює умови для покращення режимів роботи електричної мережі шляхом зменшення втрат потужності та нормалізації профілю напруги у вузлах.

Окремі результати дослідження увійшли в звіт з науково-дослідної роботи: «Методи оцінки електроенергетичних режимів, пов'язаних з впровадженням нетрадиційних джерел електроенергії, на основі нечіткої логіки» (№ ДР 0118U000591), виконаної на кафедрі ЕМС ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського. Отримані рішення можуть стати основою для створення нових методів та підходів оцінювання режимів роботи ЕМ з джерелами ВДЕ.

Результати, отримані в дисертації, використовуються в навчальному процесі та при виконанні кваліфікаційних і науково-дослідних робіт магістрантів кафедри ЕМС ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить формалізація поставлених завдань, розробка математичних моделей і методів, їх реалізація і тестування в програмно-обчислювальних комплексах, аналіз та узагальнення результатів, а саме: [1] – запропоновано підхід до регулювання напруги в мережі з джерела розподіленої генерації шляхом зміни номера відпайки трансформатора на основі синтезованого нечіткого логічного контролера; [2] – теоретично ідентифіковано параметричну залежність потужності джерела ВДЕ та оптимальної потужності синхронної машини, на основі якої створена база знань нечіткого логічного контролера для покращення техніко-економічних

показників роботи електричної мереж з джерелами ВДЕ; [3] – запропоновано метод пошуку оптимального місця та потужності джерела ВДЕ з мінімізацією повних втрат потужності в мережі на основі сенсорності фаз та модулів вузлових напруг електричної мережі; [4] – розробка методу визначення місця підключення джерела ВДЕ за принципом максимального ефекту з урахуванням коефіцієнту втрат активної потужності; [5] – розроблено рекомендації щодо визначення оптимального вузла підключення джерела розосередженого генерації відповідної потужності; [6] – аналіз впливу сонячної електростанції на режимні параметри замкненої електричної мережі 110 кВ, формування критерію обмеження потужності джерел РГ та створення рекомендацій до визначення оптимального вузла його підключення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідалися та обговорювалися на I Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками - ОКЕУ 2013» (Вінниця, 2013); на XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Крим, 2013 р.); VII ежегодной Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования – 2013» (м. Москва, 2013); I Міжнародна науково-практична навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – 2014» (м. Київ, 2014 р.); на III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками - ОКЕУ 2015» (Вінниця, 2015); на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (м. Маріуполь, 2015 р.); IV міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'15» (м. Київ, 2015 р.); на XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2016 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях України (з них 1 стаття у фаховому виданні України категорії «А»), 1 стаття в інших виданнях України, 9 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Обсяг та структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (80 найменувань) і додатків. Основний зміст викладений на 119 сторінках друкованого тексту, містить 16 таблиць, 31 рисунок. Загальний обсяг дисертації – 148 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, вказано методи дослідження, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про апробацію отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, вказано особистий внесок здобувача та публікації основних результатів дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз особливостей введення джерел ВДЕ в об'єднану енергосистему України, а також досліджено їх вплив на режимні параметри електричної мережі.

Збільшення частки децентралізованого генерування потужності в ОЕС України потребує зміни підходу до режимно-технологічного проектування, планування і керування системою, а також гостро стоїть питання підвищення маневрових потужностей енергосистеми в умовах стрімкого нарощування електростанцій з негарантованою потужністю.

Проведено аналіз проблем, що виникають в РЕМ при підключенні РГ на основі ВДЕ, серед яких - стохастичний характер виробництва електроенергії, перерозподіл потужностей по лініях електропередавання (можливість реверсивних потоків на ділянках), зміна профілю напруги в мережі, збільшення втрат потужності.

На основі проведеного аналізу встановлено (рис.1), що для кожного вузла

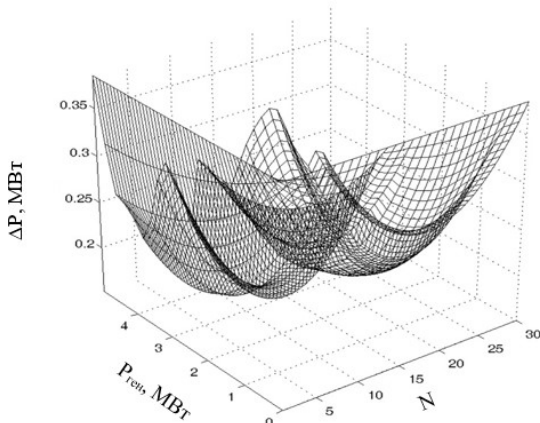


Рис. 1. Залежність втрат активної потужності від потужності генерації джерела РГ

електричної мережі зі збільшенням потужності РГ відбувається поступове зменшення втрат активної потужності, до величини оптимального значення. Подальше збільшення потужності генерації понад оптимальне значення, призведе до збільшення втрат потужності в мережі по відношенню до початкових значень. Встановлено, що джерела ВДЕ можуть як збільшувати так і зменшувати втрати потужності в РЕМ, що в основному залежить від вузлів підключення до мережі, потужності джерела та його коефіцієнта потужності, а також від топології мережі.

У **другому розділі** виконано аналіз сенсорності вузлів електричної мережі та використання їх для визначення місця підключення джерела сонячної та вітрової генерації; сформовано метод коефіцієнтів сенсорності втрат потужності, відхиленню напруг у вузлах та коефіцієнту інвестицій для визначення місць встановлення.

Для визначення місць підключення джерел ВДЕ існують різні оптимізаційні методи, кожен з яких має свої переваги та недоліки. На основі проведеного аналізу при визначенні місць підключення джерел ВДЕ в більшості випадків використовують наступні показники (як окремо кожен так і у поєднанні декількох показників одночасно): втрати активної та реактивної потужності, відхилення напруги, допустимий струм по лініях та інвестиційні коефіцієнти. При цьому можуть застосовуватись велике різноманіття критеріїв та обмежень.

Сенсорний аналіз вузлів електричної мережі дозволяє визначити рейтинг вузлів найбільш придатних для підключення ВДЕ. Розглянуто залежність ранжування вузлів електричної мережі в нормальних (базових) та після

аварійних режимах роботи за допомогою сингулярного розкладу повної та скороченої оберненої матриці Якобі, методу приростів та сальдо-провідностей. На основі проведеного дослідження встановлено, що ранжування вузлів при застосуванні зазначених підходів повністю збігається, а також з наведених методів визначення сенсорності вузлів метод приростів є ефективним та самим простим у реалізації.

В існуючих методах вітчизняних вчених визначення місць підключення ВДЕ, використовують або чутливість втрат потужності або чутливість напруг як допоміжний критерій для уточнення оптимального місця або граничної потужності. Запропоновано підхід до визначення місць підключень джерел розподіленої генерації на основі одночасного використання інформації щодо ранжування вузлів електричної мережі за коефіцієнтами чутливості втрат потужності та чутливості напруг вузлів.

Існуючі методики пошуку оптимального розміщення і вибору потужності ВДЕ при урахуванні витрат в цільовій функції передбачають тільки витрати на втрати активної потужності та витрати на встановлення джерел ВДЕ, без одночасного урахування вартості подальшого обслуговування і експлуатації.

При визначенні коефіцієнту необхідних інвестицій для впровадження джерела сонячної та вітрової генерації враховано річну вартість експлуатації мережі після встановлення ВДЕ, яка складається з вартості установки ВДЕ та експлуатації і обслуговування джерела РГ.

Відповідно до поставленої задачі та враховуючі найпоширеніші критерії й обмеження, що використовуються при розв'язанні задачі визначення оптимального місця і потужності ВДЕ, сформовано цільову функцію, яка є комплексним показником втрат потужності, зміни напруги та вартості встановлення, обслуговування та експлуатації, який визначається наступним чином:

$$Z = \min[f_n(\Delta s) \wedge k_{\text{PT}}^{\text{inv}}] = \min[\Delta K_{\Delta P(i,j)}^P \times s_{U_i} \times k_{\text{PT}}^{\text{inv}}]$$

де $\Delta K_{\Delta P(i,j)}^P$ - сенсорність втрат потужності; s_{U_i} - коефіцієнт сенсорності напруги у вузлах; $k_{\text{PT}}^{\text{inv}}$ - коефіцієнт інвестицій.

Обмеження, які застосовуються при оптимізації:

1. Напруга в усіх з вузлах навантаження має не перевищувати максимальні ($U_{\max}=1,1$ в.о.) та мінімальні значення ($U_{\min}=0,9$ в.о.):

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}$$

2. Загальна потужність генерації джерела РГ не повинна перевищувати сумарну активну потужність, яка споживається, з метою запобігання зворотнього перетоку активної потужності:

$$\sum_j P_{\text{PT},j} < P_{\Sigma}.$$

Коефіцієнти сенсорності втрат активної потужності використовуються для попереднього відбору вузлів для встановлення ВДЕ. При цьому втрати визначаються на ділянці мережі, але в подальшому розрахунку лінія замінюється на вузол, який є найбільш віддаленим від джерела живлення. Далі вузли впорядковуються за зменшенням сенсорності втрат активної потужності.

Для найбільш сенсорних вузлів по втратах активної потужності визначають коефіцієнти сенсорності по напрузі – необхідно встановити найбільш жорсткі вузли, тобто вузли параметри яких найменше змінюються при випадкових змінах у топології мережі або навантаженні. Для цього виконуємо ранжування вузлів за збільшенням коефіцієнту сенсорності.

Остаточний вибір стосовно оптимального вузла підключення сонячної та вітрової генерації обираємо відповідно до найменшого коефіцієнту необхідних інвестицій.

В загальному вигляді розроблений метод коефіцієнтів сенсорності по втратах активної потужності, по відхиленню наруги та коефіцієнту інвестицій для визначення місць підключення ВДЕ полягає у виконанні наступних етапів:

1. Для усіх ліній визначаються коефіцієнти сенсорності втрат активної потужності [$\Delta K_{\Delta P(i,j)}^P$];

2. З усіх вузлів, обираються ті, для яких значення коефіцієнтів сенсорності втрат- найбільші [$\max(\Delta K_{\Delta P(i,j)}^P)$];

3. Для вузлів, які визначені у п.2 визначають коефіцієнти сенсорності по напрузі [s_{Ui}];

4. Визначають вузли з найменшими коефіцієнтами сенсорності по напрузі [$\min(s_{Ui})$];

5. Розраховують коефіцієнт інвестицій для жорстких вузлів [K_{PI}^{inv}];

6. Формується рішення, щодо оптимального вузла підключення ВДЕ відповідно до цільової функції.

Апробація математичної моделі запропонованого методу на тестовій моделі мережі, підтвердила оптимальність визначення місця підключення джерела розподіленої генерації та значення її потужності.

У **третьому розділі** запропоновано універсальний коефіцієнт генерації на основі дослідження впливу джерел сонячної та вітрової генерації на режимні параметри замкненої електричної мережі, який дозволяє оцінити доцільність встановлення ВДЕ без виконання розрахунку режиму роботи мережі; сформовано цільову функцію математичної моделі на основі універсального коефіцієнту генерації при мінімізації втрат потужності та підтриманню рівнів напруги у вузлах електричної мережі.

За порівняння активної і реактивної складових втрат потужностей помітно, що реактивна складова в рази більша за активну. В результаті проведення великої кількості дослідів виявлено, що реактивна складова втрат потужності має такі складові:

$$\Delta Q = \Delta Q_{\text{л}} + \Delta Q_{\text{т}} - \Delta Q_{\text{зар}},$$

де $\Delta Q_{\text{л}}$ — реактивні втрати в лінії; $\Delta Q_{\text{т}}$ — реактивні втрати в трансформаторах; $\Delta Q_{\text{зар}}$ — зарядна потужність лінії.

Оскільки, зарядна потужність лінії в мережі в усталеному режимі квазістаціонарна, досліджено втрати в трансформаторах в залежності від їх коефіцієнту завантаження та втрати в лініях.

При роботі лінії в режимі навантаження в ній виникають втрати на індуктивних і активних опорах. Внаслідок введення генерації в мережу, лінія від центру живлення - балансуєного пункту (БП), до пункту з генерацією починає розвантажуватись. Зі зменшенням струму квадратично змінюються і реактивні втрати в мережі в індуктивних опорах ліній. Було встановлено, що чим більша довжина лінії від БП до пункту введення генерації, тим менші сумарні втрати реактивної потужності в індуктивних опорах лінії.

Аналіз результатів дослідження показав різко виражену залежність втрат активної і реактивної потужності від коефіцієнта завантаження трансформаторів (рис.2). При цьому залежність активних втрат потужності в мережі від коефіцієнту завантаження трансформаторів - нелінійна. Для кожного пункту при одному коефіцієнті завантаження активні втрати мають різне значення. З аналізу залежності реактивних втрат потужності в мережі від коефіцієнту завантаження встановлено, що чим менший коефіцієнт завантаження трансформаторів, тим менші реактивні втрати, а також реактивні втрати більш чутливі до коефіцієнту завантаження, ніж активні.

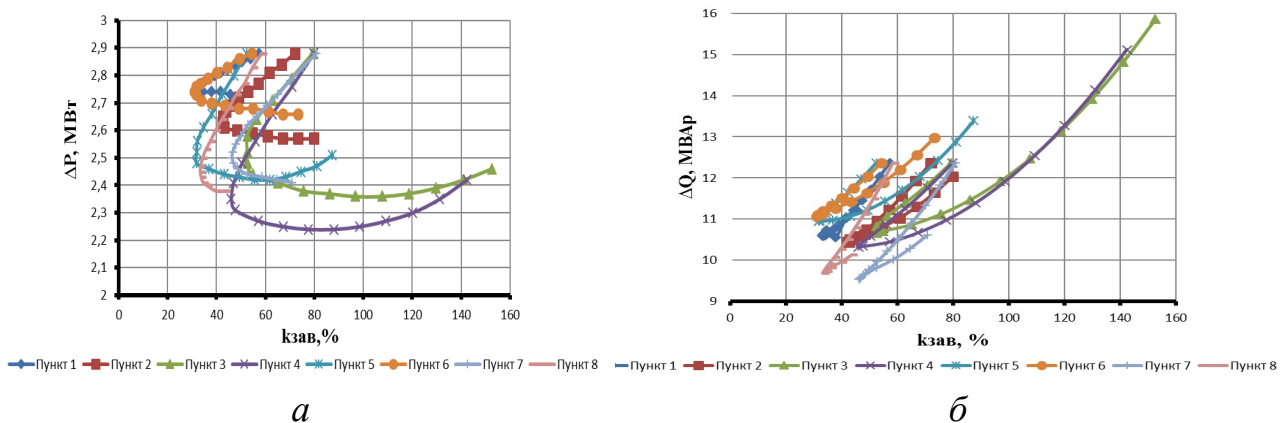


Рис. 2. Графік залежності втрат активної (а) та реактивної (б) потужностей від коефіцієнту завантаження трансформаторів при введенні генерації

З ряду дослідів та аналізу моделі в Power Factory зроблено висновок, що реактивні втрати в лінії швидше знижуються, ніж реактивні втрати трансформаторів зростають (рис.3).

Враховуючи отримані висновки було був введений *універсальний коефіцієнт генерації*, який враховує вплив генерації ВДЕ на сумарні реактивні втрати в мережі:

$$G_i = \frac{\sqrt{(P_{hi} - P_r)^2 + (Q_{hi} - Q_r)^2}}{n_t \cdot S_{ti}} + \frac{\Sigma l_k}{l_{oi}} + \frac{S_{лепi}}{\Sigma S_k},$$

$$\Sigma S_{лепi} = \sqrt{((P_{oj} + P_{hi}) - P_r)^2 + ((Q_{oj} + Q_{hi}) - Q_r)^2}$$

де P_{oj}, Q_{oj} — активна і реактивна потужності вітки

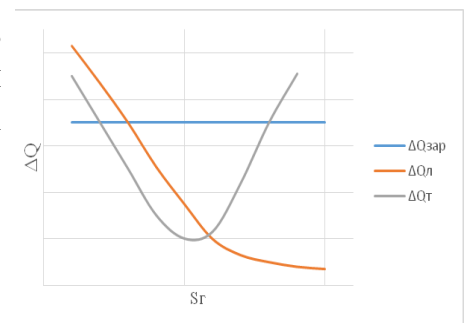


Рис.3. Схематичне зображення залежності складових реактивної

по якій живиться i -тий пункт (j -тий пункт втрати потужності від найближчий пункт до БП, який знаходиться на потужності встановленої коротшому шляху до i -того пункту); генерації

P_{ni}, Q_{ni} - активна і реактивна потужності навантаження i -того того пункту відповідно; P_i, Q_i - активна і реактивна потужності введеної генерації в i -тий пункт відповідно; n_t — кількість трансформаторів; S_{ti} — потужність трансформаторів; ΣL_k — сумарна довжина ліній контуру, в якому знаходиться i -тий пункт; L_{oi} — найкоротша довжина лінії від БП до i -того пункту; ΣS_k — сумарна потужність контуру, в якому знаходиться i -тий пункт.

Алгоритм методу знаходження оптимального вузла встановлення генерації:

1. Для кожного пункту та можливої потужності генерації виконується розрахунок *універсального коефіцієнту генерації*.

2. Визначається найменше значення *універсального коефіцієнту генерації* для кожного пункту.

3. З ряду менших значень *універсального коефіцієнту генерації* знаходиться одне найменше значення. Відповідно до нього обирається з таблиці вузол та потужність встановленої генерації.

Розроблена цільова функція на основі універсального коефіцієнту генерації дозволяє лише за початковими параметрами електричної мережі, без аналізу та проведення розрахунку режимних параметрів визначити оптимальне місце встановлення та потужність відновлювальних джерел енергії.

У **четвертому розділі** створена імітаційна модель для визначення вузла встановлення джерела сонячної та вітрової генерації, виходячи із рейтингу вузлів створеного нечітким контролером; розроблено алгоритм прийняття рішення інтелектуальної системи щодо зміни відпайки РПН на основі нечіткої логіки для підтримання напруги навантаження у нормованих значеннях

Експертна система прийняття рішень, щодо місця підключення ВДЕ за допомогою інструментарію нечіткої логіки MATLAB побудована відповідно на основі бази правил та мультимножинного вибору, представлена на рис.4.

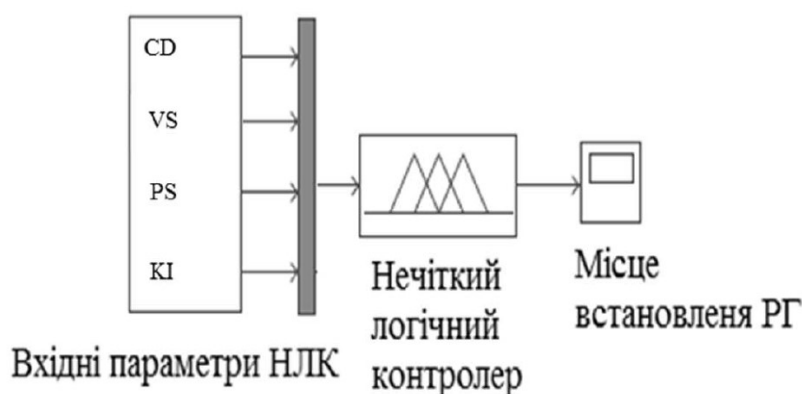


Рис. 4. Нечіткий логічний контролер для визначення місця встановлення генерації

Першою вхідною величиною є коефіцієнт чутливості втрат активної потужності (PS - power sensitive). Другою вхідною величиною буде сенсорність вузлів по напрузі (VS - voltage sensitive). Третя – різниця власної та взаємної провідностей пункту ΔB_i (CD - conduction difference). Четверта – інвестиційний коефіцієнт (KI - investment

coefficient). Вихідною величиною є рівень встановлення потужності ВДЕ.

Вхідні та вихідні величини контролера побудовані на двох типах функцій належності: трикутної та трапецієподібної формами.

База правил нечіткого контролера на основі експертної оцінки побудована на основі нечітких пропозицій, які скомбіновані між собою зв'язками “ТА”, “АБО”. Сукупність умов визначає сукупність рішень або висновків, для їх позначення використовують індикатор “ТОДІ”.

На основі аналізу поверхні відгуку нечіткого логічного контролера (рис.5) можна стверджувати, що при збільшенні коефіцієнту чутливості втрат та/або збільшенні різниці провідності вузла збільшується рейтинг вузла можливого підключення ВДЕ.

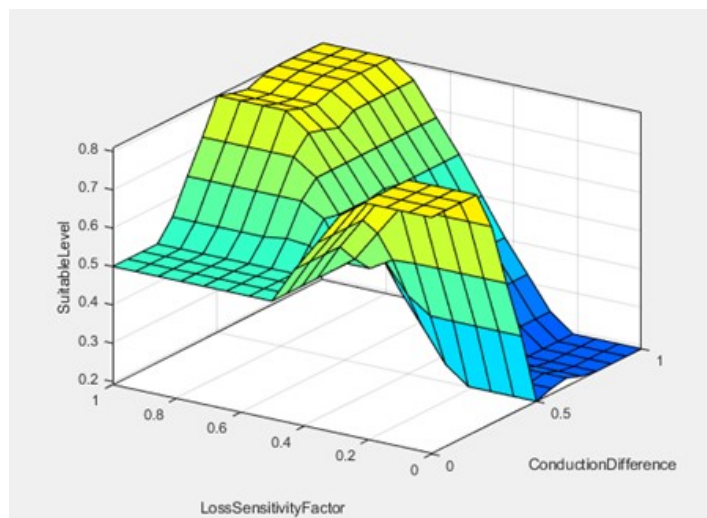


Рис.5. Поверхня відгуку нечіткого логічного контролера

Передатна характеристика синтезованого нечіткого логічного контролера дозволяє виконати ранжування вузлів електричної мережі за вхідними розрахунковими параметрами та обрати декілька вузлів для встановлення з максимальним значенням рейтингів, для яких необхідно оцінити фізичну можливість підключення ВДЕ.

Одним із можливих засобів забезпечення оптимального режиму експлуатації системи є оптимальне регулювання напруги. Задача оптимізації режиму електричної мережі за напругою складається у визначенні сталого режиму електричної мережі, при якому були б дотримані технічні обмеження та втрати активної потужності були б мінімальними.

При оптимізації режиму напруги в розподільних мережах для реалізації ефективного групового регулювання в електротехнічному комплексі, необхідно обрати приєднання, яке визначає напругу в системі.

Враховуючи стохастичний характер зміни параметрів електротехнічного комплексу, а також обмеженість об'єму засобів збору та передачі даних в таких системах, обмеженість обчислювальної техніки, зручним інструментом для рішення задачі оптимізації режиму напруги є теорія нечітких множин, яка оперує лінгвістичними змінними. В даному випадку виконується обробка лінгвістично сформованих експертних знань на основі фазі-технологій.

При створенні алгоритму регулювання напруги на основі нечіткого логічного контролера враховані наступні вимоги:

- рівень напруги у споживачів має відповідати вимогам ДСТУ EN 50160:2014;
- заборона на спрацювання пристроїв РПН при короткочасних зниженнях напруги;
- при наближенні перемикача до максимального або мінімального значення робота нечіткого логічного контролера має сповільнюватись;
- з метою запобігання швидкого зношування обладнання та його відмови, кількість перемикачів за добу має бути мінімальною.

Створений алгоритм для підтримання напруги навантаження у нормованих значеннях за допомогою РПН трансформаторів на основі нечіткого логічного контролера представлено на рис.6. та передбачає виконання наступних операцій:

1. Циклічно виконується зчитування параметрів режиму.
2. Розраховується потужність споживання.
3. Виконується фазифікація.
4. Здійснюється фазі-логічна операція та дефазифікація.
5. В регулятор пристрою РПН вводяться параметри режиму: діюча напруга та струму ліній.
6. Перевіряється стан дискретних входів на наявність будь-якого сигналу зовнішнього блокування команд «Додати» або «Зменшити».
7. Перевіряється значення струмів та напруги: якщо вхідні струми перевищують граничні допустимі значення для струму лінії або напруга перевищує нормовані значення - тоді видається заборона на команду «Додати».
8. Якщо діюче значення напруги менше мінімально допустимого значення тоді спрацьовує затримка за часом. Якщо з плином часу затримки напруга залишається менше напруги уставки спрацювання – регулювання забороняється. При збільшенні напруги вище мінімально допустимого значення - регулювання дозволяється.
9. Якщо діюче значення напруги більше максимально допустимого значення для мережі тоді спрацьовує затримка за часом видачі команди «Зменшити» при перенапрузі. Якщо з плином часу затримки напруга більша уставки спрацювання, тоді забороняється видача команди «Додати».
10. Виконується аналіз режиму напруги.

На рис.7 зображена схема підключення нечіткого логічного контролера (НЛК) до мережі. На вхід системи нечіткого виводу з датчиків знімається інформація про параметри режиму. У нашому випадку це потужності генерації ВДЕ. Сигнали, які формуються на виході системи нечіткого виводу, відповідають вихідним змінним процесу управління, тобто номерами відпайок трансформатора.

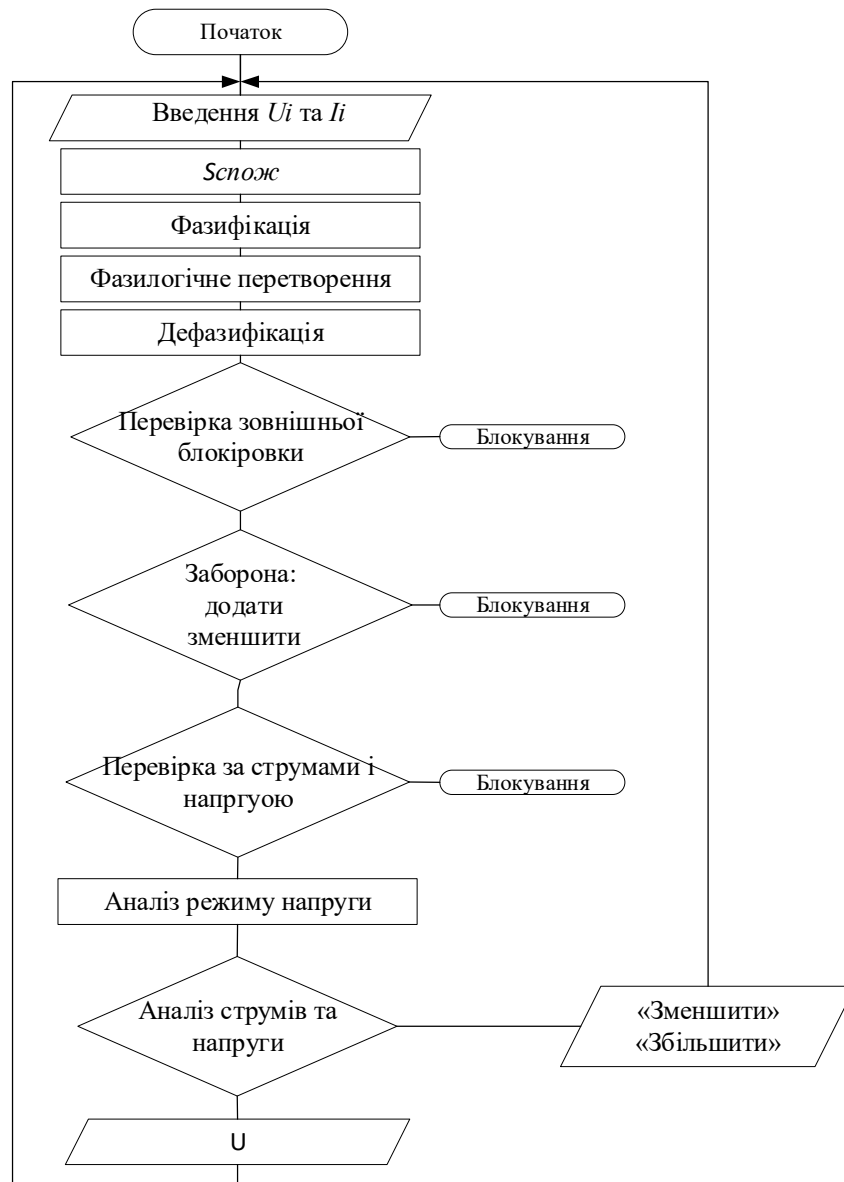


Рис.6. Алгоритм прийняття рішення регулюючим пристроєм на введення керуючого впливу для регулювання напруги

Відпрацювання алгоритму регулювання напруги виконано на тестовій схемі IEEE-30, імітаційна модель якої була створена в середовищі Matlab.

На підставі застосування універсального коефіцієнту генерації встановлено, що при підключенні вітрової електростанції у вузлі №30 і сонячної у вузлі №19 спостерігається мінімум втрат потужності в мережі. Виходячи з цього, для дослідження штучно вводилися ВДЕ у вузли №30 і №19.

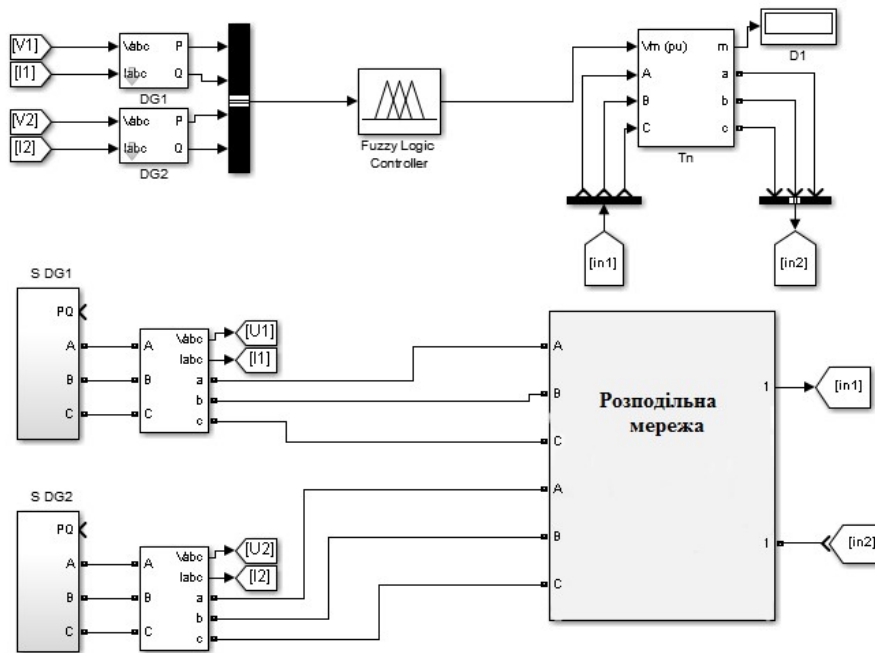


Рис.7 - Модель схеми підключення контролера до мережі

На підставі моделювання були отримані залежності режиму напруги мережі при введенні ВДЕ. На рис.8 представлений отриманий графік зміни напруги на стороні 33 кВ при введенні РГ в вузлі №30 від 0 до (50-j30) МВА. З отриманих графіків видно, що з ростом потужності генерації ВДЕ напруга в кожному вузлі зростає, причому в вузлах №27,29,30 напруга знаходиться далеко за межами допустимого рівня 1,1Uном. При введенні ВДЕ у вузол №19 потужністю від 0 до (30-j6) МВА напруга знаходиться в нормованому діапазоні.

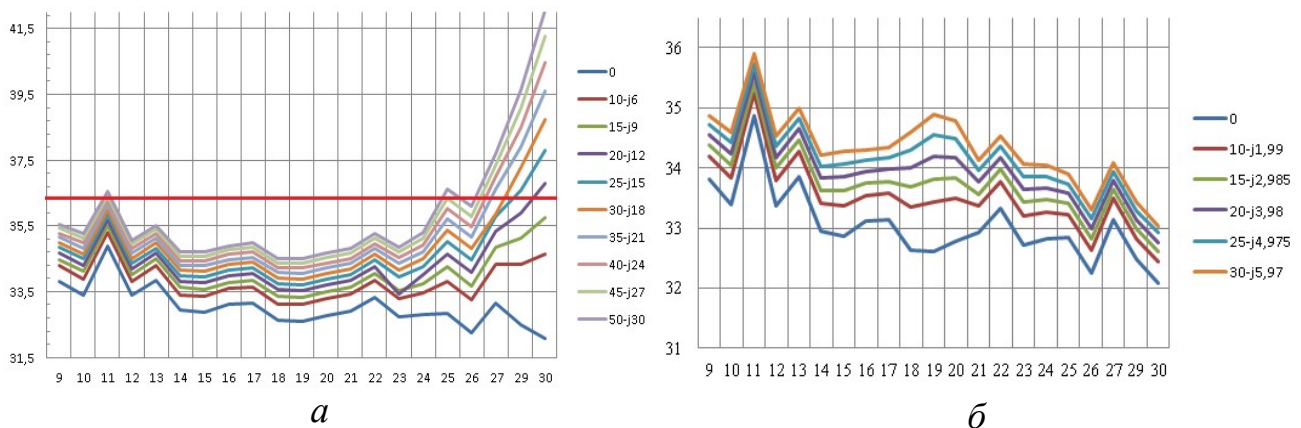


Рис.8 Профіль напруги при введенні ВДЕ в вузлі: а – №30; б – №19

При комп'ютерному моделювання використовується середовище Matlab. Початковим етапом був опис функцій належності та створення бази правил в пакеті розширення Fuzzy Logic Toolbox. Потужність джерела РГ у 30 (G30) та у 19 (G19) вузлах тестової мережі описані сімома термами нечітких змінних (G30-1÷G30-7) та (G19-1÷G19-7) відповідно.

Дані, що характеризують лінгвістичні параметри про потужності генерації кожного джерела ВДЕ зберігаються у відповідних блоках SDG1,

SDG2 і надходять на вхід НЛК. Нечіткий логічний контролер формує значення вольтодобавки, відповідно до необхідного значенні напруги для конкретного приєднання та фактичної напруги на низькій стороні трансформатора. Отримане значення вольтодобавки (U_m) надходить на вхід блока регулювання напруги під навантаженням, змінюючи тим самим напругу на вищій стороні трансформатора, і відповідно на вторинній обмотці трансформатора та приєднань, що відходять.

Виконано дослідження зміни номера відпайки РПН трансформаторів при встановленні джерел РГ у вузлах №30 та №19. На рис.9 наведено криві зміни напруги в вузлах №27,29,30 до перемикання відпайок і після здійснення НЛК керуючого впливу на РПН. В результаті зміни коефіцієнта трансформації напруга у вузла знизилась до допустимих значень.



Рис.9 Профіль напруги при введенні РГ до і після перемикання відпайок

Підвищення ефективності регулювання напруги в розподільних мережах в умовах введення джерел ВДЕ з використанням нечіткого логічного контролера дозволило здійснити регулювання рівня напруги в системі до нормованих значень, за умови мінімізації втрат електричної енергії дотримуючись норм її якості.

Синтезований нечіткий логічний контролер дозволяє сформувати команду на перемикання відпайки трансформатора і забезпечити необхідне значення напруги на низькій стороні трансформатора.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання розроблення методів та моделей узагальненої оцінки потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах для підвищення ефективності проектних та експлуатаційних рішень, що створює умови для покращення режимів роботи електричної мережі шляхом зменшення втрат потужності та підвищення якості електричної енергії з нормалізацією профілю напруги у вузлах замкненої електричної мережі.

Проведені дослідження дозволили отримати наступні результати:

1. Проведено аналіз існуючих методів оптимізації розміщення розподіленої генерації та її потужності в електричних мережах показав наявність ряду недоліків в наявних методах таких як: недостатня надійність визначення оптимального рішення, велика кількість ітерацій необхідних для

обчислень, необхідність коригування початкових умов при виборі вузлів підключення джерел ВДЕ.

2. Встановлено, що наявність сонячної та вітрової генерації може як збільшувати, так і зменшувати втрати потужності в замкненій електричній мережі, що в основному залежить від вузлів встановлення, потужності, що генерується, а також від топології мережі.

3. Запропоновано підхід до визначення оптимального вузла та потужності сонячної та вітрової генерації на основі використання жорстких вузлів електричної мережі та оптимальної потужності розподіленої генерації, виходячи із мінімальних повних втрат потужності. Встановлено, що доцільним є введення розподіленої генерації в жорсткі вузли за напругою, так як в таких вузлах при збуреннях в мережі спостерігається найменше відхилення напруги.

4. Запропоновано метод комплексного оцінювання чутливості вузлів електричної мережі для визначення оптимального вузла підключення джерела ВДЕ при мінімізації втрат потужності у мережі, зміні напруги у вузлах з урахуванням вкладень в інвестиційно-інноваційний проект ВДЕ, застосовуючи обмеження щодо загальної введеної потужності РГ та дотримання режиму напруги у вузлах без застосування додаткових засобів компенсації реактивної потужності. Даний метод дозволяє: зменшити вплив від стохастичного генерування потужності на режимні параметри мережі; оцінити вузли та потужність джерела сонячної та вітрової генерації на стадії передпроектних варіантів, а також може бути використаний при виборі оптимального варіанту на стадії проектування.

5. Запропоновано цільову функцію на основі універсального коефіцієнта генерації, яка дозволяє на основі відомих режимних параметрів без проведення додаткових розрахунків визначити максимальне значення потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах електричної мережі при плануванні її режимів роботи, що на відміну від існуючих дозволяє визначити максимальний рівень генерації активної потужності ВДЕ при дотриманні нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги та підвищення техніко-економічної ефективності функціонування електричної мережі.

6. Розроблено новий узагальнений метод короткотермінового визначення потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах електричної мережі при плануванні її режимів роботи на основі універсального коефіцієнту генерації, який враховує втрати потужності та зміни рівня напруги, як показники якості електроенергії, що забезпечує підвищення техніко-економічної ефективності функціонування електричної мережі з сонячною та вітровою генерацією.

7. Розроблено метод визначення вузла встановлення джерел розподіленої генерації на основі лінгвістичних міркувань, які реалізовані нечітким логічним контролером відповідно до створеної бази правил експертних знань, що дає можливість отримати обґрунтовані пріоритетні рішення щодо вузлів підключення сонячної та вітрової генерації, виходячи із рейтингу вузлів сформованих нечітким контролером. Пріоритет за нечіткого логічного рішення формується на основі коефіцієнтів чутливості до втрат активної потужності,

сенсорності вузла по напрузі, а також інвестицій на встановлення, експлуатацію та обслуговування джерел розподіленої генерації.

8. Розроблено математичну модель оцінки рейтингу вузлів пріоритетних для встановлення джерела генерації на основі нечіткого логічного аналізу, що дає можливість визначення місця підключення генерації по пріоритету вузлів в умовах не прогнозованості потужності генерації з урахуванням невизначеності режимної інформації.

9. Сформовано алгоритм прийняття нечіткого логічного рішення щодо комутації відпайок РПН трансформатора у вузлі електричної мережі при підключенні потужності сонячної та вітрової генерації, що дозволяє виконати коригування рівня напруги в разі недостовірності вхідної режимної інформації та забезпечити дотримання рівня якості електроенергії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІ

Матеріали дисертаційної роботи викладено в таких опублікованих наукових працях:

1. Кирик В.В., Губатюк¹ О.С. Регулювання режиму напруги мережі з джерелами розподіленої генерації. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. Вінниця, 2013. №1 (25). С. 125 – 128.

Особистий внесок: запропоновано підхід до регулювання напруги в мережі з джерела розподіленої генерації шляхом зміни номера відпайки трансформатора на основі синтезованого нечіткого логічного контролера.

2. Кирик В.В., Губатюк О.С. Створення бази знань нечіткого логічного контролера для оптимізації перетоків реактивної потужності. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. Київ, 2014. №2. С. 11 – 13.

Особистий внесок: теоретично ідентифіковано параметричну залежність потужності джерела РГ та оптимальної потужності синхронної машини, на основі якої створена база знань нечіткого логічного контролера для покращення техніко-економічних показників роботи електричної мереж з джерелами РГ.

3. Губатюк О.С. Визначення оптимального місця та потужності джерела розподіленої генерації. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. Київ, 2015. №42. С.52-55.

Особистий внесок: запропоновано метод пошуку оптимального місця та потужності джерела РГ з мінімізацією повних втрат потужності в мережі на основі сенсорності фаз та модулів вузлових напруг електричної мережі.

4. Кирик В.В., Губатюк О.С. Сенсорний метод пошуку місця встановлення джерела розподіленого генерування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2015. №6(123). С.136-140. (включено до міжнародних наукометричних баз даних Index Copernicus та РИНЦ).

Особистий внесок: розробка методу визначення місця підключення джерела РГ за принципом максимального ефекту з урахуванням коефіцієнту втрат активної потужності.

¹ Губатюк – дівоче прізвище Богомолрової О.С.

5. Кирик В.В., Богомолова О.С. Обґрунтування оптимального місця підключення джерела розосередженого генерування та значення його потужності. *Науково-практичний журнал "Електротехніка і електромеханіка"*, Харків, 2019. №2. С55-60 (**Наукове фахове видання України з технічних наук категорії «А», індексація в Web of Science™**).

Особистий внесок: розроблено рекомендації щодо визначення оптимального вузла підключення джерела розосередженого генерації відповідної потужності.

6. Кирик В.В. Оптимизация метода поиска месторасположения источников распределенной мощности / В.В.Кирик, О.С. Губатюк // *Науковий вісник Академії муніципального управління. Сер., "Техніка". Збірник наукових праць / Академія муніципального управління.* - 2015. – Випуск 2(10). – С. 67-74.

Особистий внесок: аналіз впливу сонячної електростанції на режимні параметри замкненої електричної мережі 110 кВ, формування критерію обмеження потужності джерел РГ та створення рекомендацій до визначення оптимального вузла його підключення.

7. Кирик В.В., Губатюк О.С., Моссаковский В.І. Дослідження впливу джерел розподіленої генерації на режим роботи електричної системи. *Відновлювальна енергетика XXI століття: XIV міжнарод.наук.-техн. конф.: матеріали конференції*. АР Крим, 16 вересня 2013р. С.141-143.

8. Кирик В.В., Губатюк О.С. Применение нечеткой логики для регулирования напряжения электрических сетей. *Повышение эффективности энергетического оборудования: VII Международной научно-практической конференции: мат.конференции*. Москва, 11-13 декабря 2013г. С.449-457.

9. Кирик В.В., Головій Л.П., Губатюк О.С. Інтелектуальна методика визначення місць встановлення обмежувачів перенапруги. *Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні підходи та механізми державного та муніципального управління»: мат.конференції*. Київ, 2013. С.307-309.

10. Губатюк О.С., Стрижиус О.Є. Регулювання напруги при введенні розподіленої генерації. *Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: мат.конференції*. Київ: «Політехніка», 2013. С.107-110.

11. Губатюк О.С., Дацько Н.М. Вплив розподіленої генерації на режимні параметри мережі. *Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: мат.конференції*. Київ: «Політехніка», 2013. С.110-113.

12. Кирик В.В., Губатюк О.С. Перенапряжения в сети электроснабжения и технологии их ограничения. *LXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: мат.конференції НТУ*. Київ, 2013. С.367.

13. Кирик В.В., Губатюк О.С., Журавель О.В. Комп'ютерні технології розрахунку режимів електричних мереж. *LXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників*

відокремлених структурних підрозділів університету: мат.конференції НТУ. Київ, 2013. С.368.

14. Kyryk V.V., Hubatiuk O.S. Fuzzy logic controller for on-load transformer tap changer for distribution network with distributed generation. *International scientific and practical conference World science Modern scientific achievements and their practical application*. UAE, Dubai, October 20-22, 2014.

15. Кирик В.В., Губатюк О.С. Створення бази знань нечіткого логічного контролера для оптимізації перетоків реактивної потужності. *Збірник тез та доповідей I міжнародної науково-практичної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: Стан та перспективи розвитку – 2014»*: мат.конференції. Київ, 27-29 травня 2014р., С.23.

АНОТАЦІЯ

Богомолова О.С. Методи та моделі оцінки потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах електричної мережі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове прикладне завдання пошуку оптимального вузла підключення джерел сонячної та вітрової генерації для підвищення ефективності проектних та експлуатаційних рішень, що створює умови для покращення режимів роботи електричної мережі шляхом зменшення втрат потужності та підвищення якості електричної енергії з нормалізацією профілю напруги у вузлах.

Для визначення оптимального вузла підключення джерела ВДЕ запропоновано метод комплексного оцінювання чутливості вузлів електричної мережі при мінімізації втрат потужності у мережі, зміні напруги у вузлах з урахуванням вкладень в інвестиційно-інноваційний проект ВДЕ.

Розроблено новий узагальнений метод короткотермінового визначення потужності сонячної та вітрової генерації у вузлах електричної мережі при плануванні її режимів роботи на основі універсального коефіцієнту генерації, що забезпечує підвищення техніко-економічної ефективності функціонування електричної мережі з сонячною та вітровою генерацією.

Ключові слова: електрична мережа, відновлювальні джерела енергії, сонячна генерація, вітрова генерація, потужність генерації, активна потужність, реактивна потужність, втрати потужності регулювання напруги, система регулювання під навантаженням трансформатора.

ABSTRACT

Bohomolova O.S. Methods and models for estimating the power of Solar and Wind Generation in the nodes of the Electrical Network. – On the rights of manuscripts.

The thesis submitted in fulfilment of the Candidate of Engineering Science (PhD) degree in technical sciences on specialty 05.14.02 - Electric power stations,

networks and systems. The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to solving the current scientific and applied problem of developing methods and models for finding the optimal node for connecting solar and wind sources to increase the efficiency of design and operational solutions, which creates conditions for improving the operating network by reducing power losses and improving the quality of electricity with normalizing voltage at the nodes.

As the part of stochastic capacity of RES sources in the energy balance of Ukraine is growing dynamically, there are problems of optimizing the places of their installation in electrical networks and limiting the capacity of these sources. In addition, the choice of connection only on the basis of primary indicators (such as solar insolation, wind strength and intensity, etc.) are less important than the local characteristics of the network and its condition and can worsen the technical and economic performance of electrical networks.

To determine the optimal connection point of the RES source, a method of complex assessment of the sensitivity of electrical network nodes is used. This method builds on principles of minimization power losses in the network, voltage change in nodes taking into account investments in investment-innovative RES project, applying restrictions on total input power WG and compliance with voltage regime in nodes application of additional means of reactive power compensation. This method allows to: reduce the impact of stochastic power generation on the mode parameters of the network; evaluate the nodes and power of the source of solar and wind generation at the stage of pre-design options, and can be used when choosing the best option at the design stage.

According to the research of influence of sources of solar and wind generation on elements of an electric network, was developed the universal coefficient of generation. Formed target function based on the universal generation factor while minimizing power losses and maintaining voltage levels in the nodes of the electrical network.

The expert decision-making system regarding the location of the WG with the help of the MATLAB fuzzy logic toolkit is built on the basis of the rule base and multi-set selection, respectively. Input values are the sensitivity of active power losses, the sensitivity of the nodes to the voltage, the difference between intrinsic and mutual conductivity, the investment ratio. The initial value is the level of setting the power of the DG.

The obtained transfer characteristic of the synthesized fuzzy logic controller allows ranking the nodes of the electrical network according to the input calculation parameters and selecting several points for installation with the maximum value of ratings, for which it is necessary to assess the physical possibility of installing DG sources.

In the dissertation, the choice of the defining connection is performed using the methods of fuzzy logic theory, which operates on linguistic variables. In this case, the processing of linguistically formed expertise on the basis of phase technology is performed. The synthesized fuzzy logic controller allows you to generate a command

to switch the soldering of the transformer and provide the required voltage value on the low side of the transformer.

Improving the efficiency of voltage regulation in distribution networks in the introduction of distributed generation sources using a fuzzy logic controller allowed regulating the voltage level in the system to rational values, while minimizing electricity losses in compliance with its quality standards.

The practical value of the obtained results is that the express method of estimating the maximum power and connection node of solar and wind generation at the stage of formation of design solutions is developed, which allows to increase the efficiency of network operation and ensure minimum power loss and normalized network voltage

A new generalized method of short-term determination of solar and wind generation capacity in electrical network nodes in planning its operating modes based on universal generation factor, which takes into account power losses and changes in voltage level as indicators of electricity quality, which improves technical and economic efficiency of electricity network with solar and wind generation.

Keywords: electrical network, renewable energy sources, solar generation, wind generation, generation power, active power, reactive power, power losses, voltage regulation, transformer load control system.

Підписано до друку 01.04.2021 р. Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – цифровий. Ум. друк. арк. 1,16. Наклад 120 пр.
Зам. № 2112.

ФО-П Маслаков Руслан Олексійович
Свідоцтво ДК № 4726 від 29.05.2014 р.
Видавничий дім “Освіта України”
04136, Київ, вул. Маршала Гречка, 13, оф.808
тел. (095) 699-25-20